

산사태 위험도 추정을 위한 간극수압 예측에 관한 연구 (Ⅲ)

-모델 매개변수 분석-

Groundwater Pressure Predictions on Hillside Slopes for Assessing
Landslide Risks(Ⅲ)

-Model Parameter Identification-

이	인	모* ¹	임	충	모* ²
Lee,	In	- Mo	Im,	Chung	- Mo
박	경	호* ³	서	정	복* ⁴
Park,	Kyung	- Ho	Seo,	Jeong	- Bok

Abstract

In general, the conceptual lumped-parameter groundwater flow model to predict the groundwater fluctuations in hillside slopes has unknown model parameters to be estimated from the known input-output data. The purpose of this study is to estimate the optimal model parameters of the groundwater flow model developed by authors. The Maximum A Posteriori(MAP) estimation method is utilized for this purpose and it is applied to a site which shows the typical landslide in Korea. The result of application shows that the MAP estimation method can estimate the unknown parameters properly well. The groundwater model developed along with estimation technique applied in this paper will be used for assessing risk of landslides.

요 지

일반적으로 산사면에서의 지하수위를 예측하기 위한 개념적인 지하수위 예측 모델은 미지의 모델 매개변수들을 포함하고 있으며, 이들은 관측된 입력치와 결과치를 이용하여 평가할 수 있다. 본 논문의 목적은 이미 필자들에 의해서 개발된 지하수위 예측모델이 포함하고 있는 매개변수들의 최적값을 구하고자 하는 것이다. 이를 위하여 MAP(Maximum A Posteriori) 방법을 이

*¹ 정회원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수

*² 정회원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 공학석사

*³ 정회원, 목포전문대학 토목과 조교수

*⁴ 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 석사과정

용하였으며, 실제 산사태 사면에 적용하였다. 그 결과, MAP 방법을 이용하여 미지의 매개변수들의 최적값을 적절하게 구할 수 있었으며, 필자들에 의해 개발된 지하수위 예측 모델에 매개변수의 최적치를 구함으로써 산사태 위험도 추정에 이용될 수 있다.

1. 서 론

지반공학적인 시스템을 분석하기 위한 수학적 모델(mathematical model)은 지반의 지형학적 및 물리적인 특성을 입력하여, 외부에서 가해진 영향으로 인하여 발생하게 될 지반의 현상을 예측하게 된다. 그러나, 일반적으로 모델을 통한 예측과 실제의 지반반응 사이에는 큰 차이가 발생하며 이것은 두가지 원인으로 생각될 수 있다.^{(4),(7)}

i) 수학적 모델은 자연 현상을 수식화 하는 과정으로, 이 과정 자체에서 발생하는 오차와 수치모델(numerical model)로 모델화 하는 과정에서 오차가 발생할 수 있다.

ii) 지반공학에서 특히 중요한 것이 각종 모델 매개변수들에 대한 최적값의 예측이며, 이 분야에서 발생하는 오차가 더 크고 중요하다고 할수 있다. 일반적으로 지반공학분야에서 사용하는 매개변수 분석방법은 다음의 두가지로 나눌 수 있다.^{(4),(7)}

① 확정론적인 방법(deterministic approach)

이것은 시스템과 모델 변수 사이의 차이를 확정론적인 신호(deterministic signal)로 간주하여, 적절하게 정의된 목적함수를 최소화시키는 방법이다. 여기는 역(Inverse)방법과 직접(Direct)방법 등이 있다.^{(9),(10)}

② 통계학적인 방법(statistical approach)

이것은 시스템과 모델 변수 사이의 차이를 확정론적인 신호(deterministic signal)로 간주하여, 적절하게 정의된 목적함수를 최소화시키는 방법이다. 여기는 역(Inverse)방법과 직접(Direct)방법 등이 있다.^{(9),(10)}

② 통계학적인 방법(statistical approach)

이것은 시스템과 모델 변수 사이의 차이를 무작위 신호(random signal)로 간주하며, 평균값, 분산과 같은 확률 도구를 사용하여 목적함수의 최소화를 유도하는 방법이다. 이 방법은 Bayesian 방법과 Kalman Filter 방법으로 나눌 수 있다.^{(5),(8),(13)}

본 논문의 목적은 이미 개발된 지하수위 예측 모델(이인모동^{(1),(2)})의 적용에서 중요시 되는 모델 매개변수의 예측 및 그 분석을 수행하는 것으로, 이를 위하여 MAP 방법(maximum a posteriori estimation method)을 이용하였다. 먼저, MAP 방법에 대한 이론적인 유도 과정을 자세하게 서술하였으며, 실제 산사태(debris avalanche)가 발생했던 야산 현장에서 관측된 지하수위와 시간별 강우강도 등의 자료를 이용하여 MAP 방법의 매개변수 분석 능력을 연구하였다.

2. MAP 방법의 이론적 고찰

MAP 방법은 어떤 매개변수를 가장 합리적으로 예측하기 위하여 관측치에 의한 정보 뿐만 아니라 미지의 매개변수의 초기 예측치의 합리성이나 불확실성까지도 같이 고려하여 최적의 예측을 할 수 있는 방법이다.⁽⁶⁾ MAP 방법에 대한 목적함수의 이론적인 유도과정과 비선형문제에 대하여 매개변수 예측을 빠른 수렴과정을 통하여 구할 수 있는 Box-Kanemasu 방법에 대한 이론적인 설명이 다음에 자세히 제시되어 있다.

2.1 목적함수의 유도

대부분의 수학적 모델은 다음의 비선형 함수 형태로 나타낼 수 있다.

$$Y' = \Pi(\beta) \quad (1)$$

여기서, Y' 는 모델로부터 구한 관측벡터($m \times 1$), β 는 미지의 모델 매개변수 벡터($n \times 1$)이다. 관측오차가 평균이 0이고 m 개의 정규분포를 가지며 시간에 독립적이라고 가정하면, β 가 주어진 상태에서의 Y 의 확률밀도함수(conditional probability density function)는 관측오차의 확률밀도함수와 같게 된다.

$$f(Y/\beta) = [(2\pi)^m |V|^{-1/2} \exp\{-\frac{1}{2} [Y - \Pi(\beta)]^T V^{-1} [Y - \Pi(\beta)]\}] \quad (2)$$

여기서, Y 는 현장에서 관측한 값들의 관측벡터($m \times 1$), V 는 관측오차의 공분산행렬($m \times m$), 윗첨자 T 는 행렬의 transpose를 의미한다. 미지의 매개변수들이 n 개의 정규분포를 가진다고 가정하면, β 의 확률밀도함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(\beta) = [(2\pi)^n |V_\beta|^{-1/2} \exp\{-\frac{1}{2} [\beta - \mu_\beta]^T V_\beta^{-1} [\beta - \mu_\beta]\}] \quad (3)$$

여기서, μ_β 와 V_β 는 각각 β 의 평균값과 분산이며, 특히 매개변수들이 서로 상관성을 갖지 않는다면, V_β 는 대각선행렬(diagonal matrix)이 된다.

MAP 방법의 목적은 $f(\beta/Y)$ 를 최대화시킴으로써 미지의 매개변수들의 최적화를 이루는 것이다. Bayes 이론을 이용하여 Y 가 주어진 상태에서의 β 의 확률밀도함수를 구하면,

$$f(\beta/Y) = \frac{f(Y/\beta) f(\beta)}{f(Y)} \quad (4)$$

또는 분자는 단지 정규화 시키는 상수이므로

$$f(\beta/Y) \propto f(Y/\beta) f(\beta) \quad (5)$$

의 형태로 나타낼 수 있다.

$f(\beta/Y)$ 를 최대화하는 것은 $f(\beta/Y)$ 의 자연 로그를 최대화하는 것과 같기 때문에 $f(\beta/Y)$ 의 자연로그를 구하면 다음과 같다.

$$\ln[f(\beta/Y)] \propto -\frac{1}{2} [(m+n)\ln(2\pi) + \ln V + \ln V_\beta + S_{MAP}] \quad (6)$$

여기서,

$$S_{MAP} = [Y - \Pi(\beta)]^T V^{-1} [Y - \Pi(\beta)] + (\beta - \mu_\beta)^T V_\beta^{-1} (\beta - \mu_\beta) \quad (7)$$

따라서, 식(7)로부터 S_{MAP} 를 최소화 시킴으로써 미지의 매개변수들을 구할 수 있으며, 특히 식(7)을 목적함수(objective function)라 한다. S_{MAP} 를 최소화 시키기 위하여 Gauss-Newton 방법과 수정된 Box-Kanemasu 방법을 사용하였다.

2.2 Gauss-Newton 방법

Gauss-Newton 방법은 S_{MAP} 를 β 에 대하여 미분한 값이 0이 되도록 함으로써 S_{MAP} 를 최소화 시키는 방법이다.

$$\frac{\partial S_{MAP}}{\partial \beta} = 2 \left[-\frac{\partial \Pi^T(\beta)}{\partial \beta} \right] V^{-1} [Y - \Pi(\beta)] + 2 [I] V_\beta^{-1} [\beta - \mu_\beta] = 0 \quad (8)$$

또는,

$$X(\beta)^T V^{-1} [Y - \Pi(\beta)] + V_\beta^{-1} [\mu_\beta - \beta] = 0 \quad (9)$$

여기서, X 는 다음과 같이 정의되는 민감도 행렬(sensitivity matrix, $m \times n$)이다.

$$X(\beta) = \left[\frac{\partial \Pi^T(\beta)}{\partial \beta} \right]^T \quad (10)$$

β 가 Π 에 내재되어 있기 때문에, β 를 구하기 위해서 Taylor 급수(Taylor's series)의 첫번째 두 개의 항만을 사용하여 $\Pi - \beta$ 의 관계를 선형화 시킨다.

$$\Pi(\beta) \approx \Pi(b) + X(b) [\beta - b] \quad (11)$$

식(11)을 식(9)에 대입하면,

$$X^T(b) V^{-1} [Y - \Pi(b) - X(b) (\beta - b)] + V_{\beta}^{-1} (\mu_{\beta} - b) - V_{\beta}^{-1} (\beta - b) \approx 0. \quad (12)$$

식(12)를 $b^{(k+1)}$ 에 대한 행렬 형태로 나타내면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$b^{(k+1)} = b^{(k)} + P^{(k)} [X^{T(k)} V^{-1} (Y - \Pi^{(k)}) + V_{\beta}^{-1} (\mu_{\beta} - b^{(k)})] \quad (13)$$

$$P^{(k)} = X^{T(k)} V^{-1} X^{(k)} + V_{\beta}^{-1} \quad (14)$$

식(13)과 (14)를 Gauss 선형 함수식(linearization equation)이라 하며, 윗첨자 k는 비선형성으로 인한 반복단계를 나타낸다.

각 반복단계에서의 수렴을 지적하는 규약은 다음 식을 사용한다.

$$\frac{|b_i^{(k+1)} - b_i^{(k)}|}{|b_i^{(k)}| + \delta_i} < \delta, \quad i = 1, 2, \dots, n \text{에 대하여} \quad (15)$$

여기서, δ 는 각각의 매개변수에 대한 한계치(tolerance limit)를 나타내며, δ_i 는 $b_i^{(k)}$ 가 0으로 되는 상태를 고려하기 위한 10^{-10} 과 같은 한계치를 나타낸다.

2.3 수정된 Box-Kanemasu 방법

수정된 Box-Kanemasu 방법은 매개변수를 평가하는 수렴방향의 크기를 조절하도록 하여 수렴과정이 빨리 이루어지도록 하는 것이다.

이를 위하여 보간인자(scalar interpolation factor) $h^{(k+1)}$ 을 이용하여 식(13)을 다음과 같이 수정한다.

$$b^{(k+1)} = b^{(k)} + h^{(k+1)} \Delta_R b^{(k)} \quad (16)$$

$$\Delta_R b^{(k)} = P^{(k)} [X^{T(k)} V^{-1} (Y - \Pi^{(k)}) + V_{\beta}^{-1} (\mu_{\beta} - b^{(k)})] \quad (17)$$

식(16)에서 $h^{(k+1)}$ 는 매개변수의 큰 단계 변화로 인하여 초래되는 진동(oscillation)이나 불안정성(unstability)을 막아주며, 작은 단계 변화를 유도함으로써 빠르게 수렴하도록 조절하여 준다. $h^{(k+1)}$ 이 1인 경우에는 완전히 Gauss-Newton 방법과 같으며, 그림 1은 전반적인 MAP 방법의 계산과정에 대한 흐름도를 보여주고 있다.

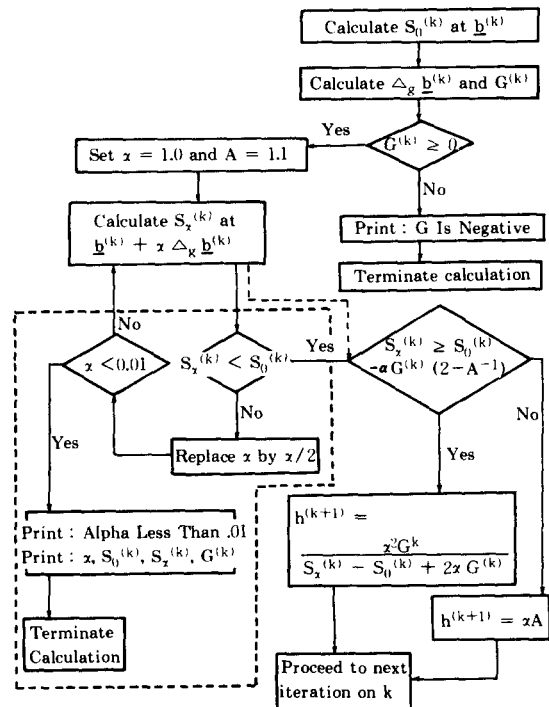


그림 1. MAP 방법의 계산 알고리즘

3. 지하수위 흐름 모델

본 논문에서 제시된 MAP 방법을 이용하여 이인모등⁽¹⁾⁽²⁾에 의하여 제안된 산사면에서의 지하수위 예측 모델에서 최적의 모델 매개변수를 구하고자 하였다. 지하수위 예측 모델은 비포화대 흐름 모델과 포화대 흐름 모델의 조합으로 이루어져 있으며 이에 대하여 다음에 간단히 설명하였다.

산사면에서의 비포화대 흐름은 abc 모델을 이용하여 모델화한다.⁽³⁾ 이 모델은 두개의 상태변수, W_i 와 Y_i 를 가지며 이들 변수 사이의 관계를 다음의 비선형 함수식에 의하여 정의한다.

$$Y_i(W_i) = \frac{(W_i + b)}{2a} - \left[\left[\frac{(W_i + b)}{2a} \right]^2 - \frac{W_i b}{a} \right]^{0.5} \quad (18)$$

여기서,

$$W_i = P_i + S_{i-1} \quad (19)$$

$$Y_i = S_i + E_i \quad (20)$$

윗 식에서 P_i 와 E_i 는 각각 i 시간 동안의 강우강도와 실제증발산량, S_{i-1} 과 S_i 는 $i-1$ 과 i 시간에 있어서의 비포화대에서의 저류량(soil moisture storage), a 와 b 는 모델매개변수이다.

비포화대에서 포화대로의 연직의 지하수 유입량 GR_i 는 다음 식으로부터 구한다.

$$GR_i = c \times (W_i - Y_i) \quad (21)$$

포화대 흐름은 선형저수지모델(linear storage reservoir model)을 이용하여, 산사면을 n 개의 저수지로 이상화 시킨다. 산사면 전체

길이가 짧은 경우에는 1개의 저수지로 이상화시킬 수 있으며, 이때의 지하수 유출량은 물평형 방정식으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$O^{(i)} = O^{(i-1)} \exp \left[-\frac{\Delta t}{K} \right] + \frac{GR_i \times AREA}{K} \Delta t \quad (22)$$

여기서, 윗첨자 0과 1은 각각 시간간격 Δt 의 시작과 끝을 나타내며, K 는 포화대에서의 저류계수(storage coefficient), $AREA$ 는 산사면의 전체 면적을 나타낸다. 실제로 관측하는 것은 유출량이 아니고 지하수위이기 때문에, 식(22)에서 구한 지하수 유출량을 지하수위로 나타내어야 한다. 이를 위하여 (i) 관측점에서의 포화대 흐름이 사면의 기저암과 평행하며 (Dupuit-Forchheimer 가정), (ii) 지하수 유출량의 증감이 관측된 지하수위의 증감에 비례한다고 가정하여 다음의 식을 유도한다.

$$h_i' = h_{i-1}' + \frac{\Delta O}{\cos \alpha \sin \alpha Ks} \quad (23)$$

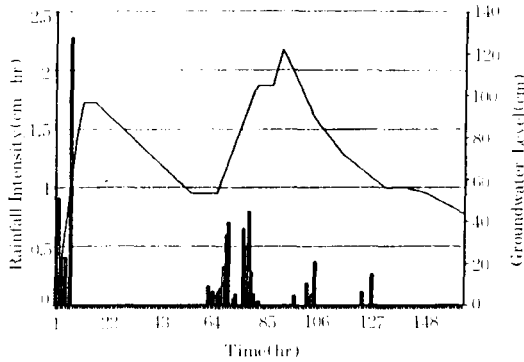
$$\Delta O = O^{(i)} - O^{(i-1)} \quad (24)$$

여기서, h_{i-1}' 와 h_i' 는 각각 $i-1$ 과 i 시간에서의 관측된 지하수위, α 는 사면의 경사각, K 는 포화투수계(saturated permeability coefficient)를 의미한다.

4. 적용 예제

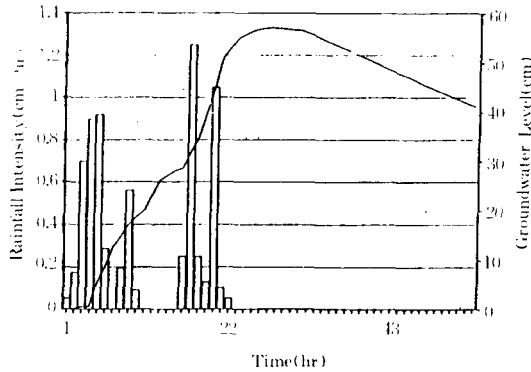
4.1 관측된 지하수위와 초기치 설정

개발된 지하수위 예측 모델 MAP 방법을 실제 산사태가 발생했던 산사면에 적용하기 위하여 '89년 서울 구로구 시흥동에 위치한 야산 현장에서 관측한 지하수위를 이용하였다.⁽¹⁾⁽²⁾ (3) 이 지역은 '77년과 '87년에 규모가 큰 산사태가 발생하였으며, 그 외에도 작은 규모의 산사태가 빈번히 발생하였던 곳으로 우리나라의 전형적인 산사태 사면을 보여주고 있다.



Rainfall Intensity --- Groundwater level

(a) 첫번째 강우(7월 25일~31일)



Rainfall Intensity --- Groundwater level

(b) 두번째 강우(8월 27일~30일)

그림 2. 시간별 강우강도와 지하수위

표 1. 입력치와 매개변수의 초기치

	기 호	입력치(초기치)	
사면의 경사각	α	35	
포화 투수계수	K_s	3.62×10^{-3} cm/sec	
잠재 증발산량	V_f	0.011 cm/hr	
모델 매개변수		평균값	분 산
	b	40.0	232.730
	c	0.9	0.01389
	K	7224.23	1000.0

그림 2는 관측공으로부터 관측된 2개소의 지하수위와 관악산 기상 관측소에서 관측한 시간별 강우강도를 보여주고 있다. 야산 현장은 불투수층인 기반암 위에 0.95~2.5m의 얇은 토층으로 이루어져 있으며, 포화투수계수는 현장 변수위 실험(in-situ falling head test) 결과로부터 $1.5 \times 10^{-3} \sim 7.5 \times 10^{-3}$ cm/sec의 범위를 가진다. 모델을 적용하기 위하여 필요한 지반 및 기상 특성의 입력치와 모델 매개변수의 초기치가 표 1에 정리되어 있다. 이들에 대한 자세한 설명은 참고문헌⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾을 참조하기 바란다.

4.2 적용 결과 및 토의

이인모등⁽⁴⁾은 최적 매개변수 분석을 통하여 매개변수들의 최적값을 구할 때 변수 a의 변화가 목적함수의 값에 크게 영향을 미친다는 것을 보여주었다. 먼저, 변수 a에 대한 목적함수의 영향을 알기 위하여 a를 고정시킨 후 MAP 방법을 이용하여 전체적인 최적의 매개변수와 목적함수의 값의 변화를 구하였다. 표 2와 3은 두 강우에 대한 그 결과를 보여주고 있으며, 결과를 보면 a의 값이 0.9~1.0 사이에 있을 때 목적함수의 값이 작으므로, 변수 a의 최적치가 이들 사이의 값을 가짐을 알 수 있다. 표 4는 변수 a의 범위를 더 세분화하여 구한 최적의 매개변수와 목적함수의 값을 보여준다. 본 결과를 보면 MAP 방법이 최적의 매개변수 분석을 수행하고 있음을 알 수 있다.

표 5는 앞에서 구한 최적의 매개변수들의 값을 두 강우에 대하여 평균한 값을 보여주고 있으며, 그림 3과 4는 이 평균값을 각각 적용하여 구한 지하수위 예측의 결과를 보여주고 있다. 결과를 보면, 예측치와 실측치가 잘 일치함을 보여주고 있어, 본 매개변수 예측 방법의 효용성을 보여준다.

그림 5와 6은 평균값을 이용하여 구한 지하수 유입량의 변화를 보여주고 있다. 이를 보면, 계속되는 강우로 인하여 지하수 유입량이 증가

표 2. a 값에 대한 목적함수의 영향(첫번째 강우)

a	b	c	K	목적함수
0.1	63.59	0.285	7250.9	326.8
0.2	109.22	0.406	7236.8	242.2
0.3	139.80	0.443	7231.5	218.5
0.4	135.33	0.475	7226.8	200.0
0.5	135.55	0.493	7223.7	180.4
0.6	130.36	0.548	7223.8	157.5
0.7	122.75	0.593	7225.6	130.8
0.8	115.79	0.688	7225.3	98.1
0.9	89.86	0.779	7226.6	58.3
1.0	40.32	0.900	7224.2	95.3

표 3. a 값에 대한 목적함수의 영향(두번째 강우)

a	b	c	K	목적함수
0.1	121.74	0.269	7247.9	392.5
0.2	185.36	0.421	7233.9	326.2
0.3	181.19	0.442	7234.9	294.6
0.4	176.89	0.481	7227.4	259.9
0.5	171.86	0.545	7225.4	221.2
0.6	165.59	0.620	7226.1	179.0
0.7	151.93	0.688	7224.9	132.9
0.8	131.47	0.748	7225.4	84.9
0.9	97.66	0.867	7224.3	34.5
1.0	39.79	0.900	7224.2	49.2

표 4. 최적의 매개변수와 목적함수 값

a	b		c		K		목적함수	
	강우1	강우2	강우1	강우2	강우1	강우2	강우1	강우2
0.970	46.54	47.23	0.876	0.920	7231.9	7224.9	34.31	10.59
0.972	43.55	44.47	0.843	0.933	7228.2	7226.5	33.82	10.57
0.974	42.68	42.42	0.869	0.909	7229.2	7226.3	33.32	10.43
0.976	41.81	41.23	0.897	0.940	7229.2	7225.2	32.92	10.21
0.978	41.72	40.01	0.918	0.930	7228.4	7224.1	32.35	10.15
0.980	40.00	40.60	0.900	0.928	7224.2	7224.3	32.37	10.40
0.982	40.00	38.21	0.900	0.937	7224.2	7227.9	32.45	10.77
0.984	39.39	35.23	0.924	0.927	7232.0	7224.1	33.02	11.03
0.986	37.85	31.29	0.935	0.957	7236.0	7223.4	34.04	11.25
0.988	33.61	28.89	0.926	0.974	7231.6	7227.9	34.23	12.05

표 5. 최적 매개변수의 정수값

a	b	c	K
0.978	40.87	0.924	7226.25

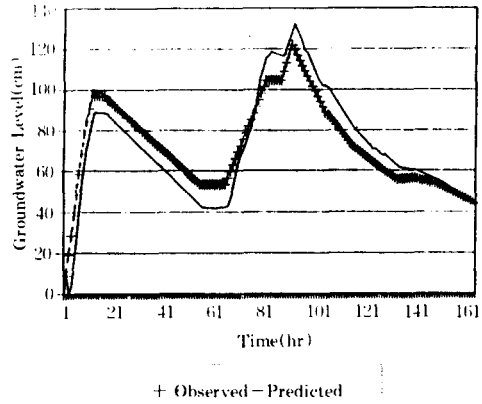


그림 3. 지하수위의 예측(첫번째 강우)

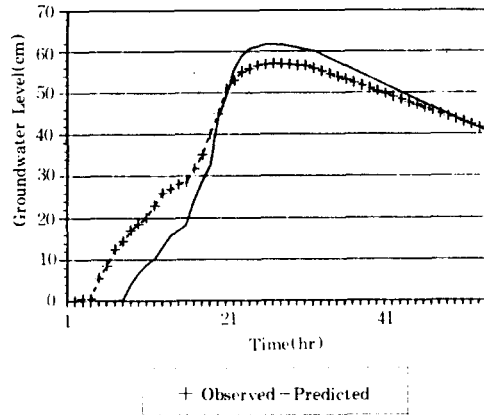


그림 4. 지하수위의 예측(두번째 강우)

하는 것을 보여주고 있으며 강우가 멈춘 후에도 지하수 유입량의 값은 감소하지만, 계속적으로 포화대로 유입량을 흘려 보내고 있다. 특히 시간별 강우강도보다 더 큰 지하수 유입량을 발생시킴으로써 지하수위의 상승 효과를 초래하고 있다. Sidle¹¹ 이 그의 지하수위 관측 연구에서 지하수위의 상승률이 예측될 수 있는

강우의 연직의 유입량보다 더 높을 수도 있다는 결론을 고려한다면, 본 연구에서 예측된 지하수 유입량의 적절성을 보여주고 있으며, 또한 본 지하수위 흐름 모델은 비포화대의 저류능력(storage capacity)과 시간 지체 효과(time delay effect)를 고려해줄 수 있음을 보여준다.

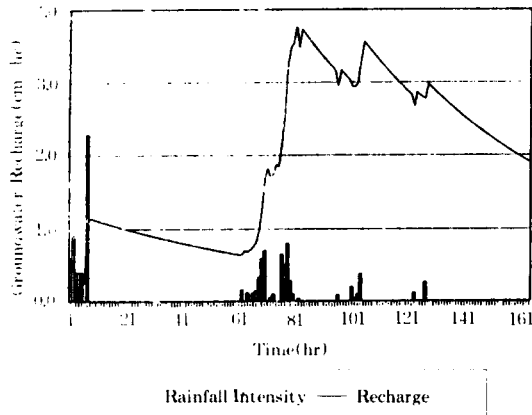


그림 5. 지하수 유입량의 변화(첫번째 강우)

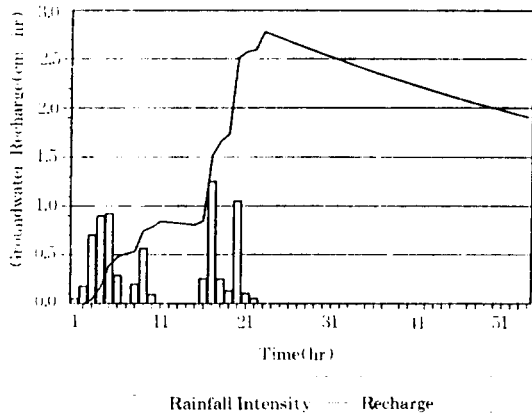


그림 6. 지하수 유입량의 변화(두번째 강우)

5. 결 론

본 논문은 지하수위 예측 모델의 개발에서 중요시 되는 최적 매개변수 분석을 위하여

MAP 방법의 적용성을 연구하였다. 먼저 관측된 지하수위 자료로부터 MAP 방법으로 각종 매개변수의 최적값을 구하였으며, 이 최적 매개변수의 평균값을 이용하여 지하수위를 예측하여 실측치와 비교, 분석하였다. 그 결과, MAP 방법을 지하수위 예측 모델에 적용하여 모델 매개변수의 최적값을 구할 수 있었으며, 이 과정에서 변수 a의 작은 변화가 목적함수에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 본 논문에서는 변수 a의 값을 고정시킨 후 다른 매개변수들을 구하는 방법을 선택하여 최적의 매개변수 값을 구할 수 있었다. 최적의 매개변수를 이용하여 구한 예측치와 실측치는 거의 일치하며 본 모델의 적합성을 보여주었다. 본 연구에서 개발된 지하수위 예측 모델은 그 매개변수의 최적치를 구함으로써 산사태 위험도 추정에 이용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(과제번호: 911-1306-015-2)의 기초 연구비 지원에 의하여 수행된 것으로, 이에 대하여 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 이인모·박경호·임충모(1992). "산사태 위험도 추정을 위한 간극수압 예측에 관한 연구(Ⅰ)-지하수 유입량의 비교연구," 한국지반공학회지, 8(1), pp.81-100.
- 이인모·박경호·임충모(1992). "산사태 위험도 추정을 위한 간극수압 예측에 관한 연구(Ⅱ)-지하수위 예측 모델의 개발," 한국지반공학회지, 8(2), pp.5-20.
- 조천환·나경준·구호본(1989). "사면의 안전진단 및 보호공법," 전기연 연구보고서, 전기연 89-GE-111, 331p.
- Arai, K., Ohta, H., and Miyata, M.(1991) "Comparison of static and statistical methods for back-analysis of elastic

- consolidation problems," Proc. 7th Int. Conf. on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Cairns, Vol. 2, pp. 949-954.
5. Asaoka, A. and Matsuo, M.(1979) "Bayesian approach to inverse problem in consolidation and its application to settlement prediction," Proc. 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Aachen.
 6. Beck, J.V. and Arnold, K.J.(1977) "Parameter estimation in engineering and science," John Wiley & Sons, Inc., 551p.
 7. Cividini, A., Jurina, L., and Gioda, G.(1981) "Some aspects of characterization problems in geomechanics," Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 18, pp.487-503.
 8. Cividini, A., Maier, G., and Nappi, A.(1983) "Parameter estimation of a static geotechnical model using a Bayes' approach," Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 30(5), pp.251-226.
 9. Gioda, G. and Jurina, L.(1981) "Numerical identification of soil structure interaction pressures," Int. J. Num. Analyt. Meth. Geomech., 5, pp.33-56.
 10. Gioda, G. and Maier, G.(1980) "Direct search solution of an inverse problem in elastoplasticity : identification of cohesion, friction angle and in situ stress by pressure tunnel tests," Int. J. Num. Meth. Engrg., 15, pp. 1823-1848.
 11. Sidle, R.C.(1985) "Shallow groundwater fluctuations in unstable hillslopes in coastal Alaska," Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 20(2), pp.79-95.
 12. Thomas, H.A., Jr.(1981) "Improved methods for national water assessment," Report to WRC(WR 15249270), U.S. Water Resour. Counc., Washington, D.C.
 13. Tomizawa, M.(1980) "Identification of a one-dimensional model for a soil-layer-bedrock system during the earthquake," Earthq. Engng. Struct. Dynam., 8.

(접수일자 1992. 7. 14)